

智能灌溉与土地平整技术在节水型高标准农田中的集成应用

李伟群

环江毛南族自治县自然资源生态修复中心 广西 河池 547100

摘要: 水资源短缺已成为制约我国农业可持续发展的关键瓶颈。建设节水型高标准农田是保障国家粮食安全、提升农业综合效益和实现绿色发展的战略举措。本文聚焦于智能灌溉系统与现代土地平整技术在节水型高标准农田建设中的协同机制与集成路径。通过分析两类技术的核心原理、发展现状及各自优势,深入探讨其在田间尺度上的耦合逻辑与集成模式,并结合典型区域应用案例,评估其节水增效、节本降耗与生态效益。研究表明,智能灌溉与高精度土地平整的深度融合,能够显著提升农田水分利用效率,减少灌溉用水量,同时改善作物生长均匀性,提高产量。最后,文章提出推动该集成技术规模化应用的政策建议与未来研究方向,以及为我国高标准农田建设提供理论支撑与实践参考。

关键词: 智能灌溉; 土地平整; 节水农业; 高标准农田; 水肥一体化; 精准农业

引言

农业是全球淡水资源的消耗大户,我国农业用水占比超60%,但灌溉水有效利用系数远低于发达国家,水资源浪费严重。城镇化、人口增长及气候变化加剧,让农业用水供需矛盾愈发突出。在此情形下,“藏粮于地、藏粮于技”战略被提出,推进高标准农田建设成为保障粮食安全的“压舱石”,其中“节水高效”是核心目标之一。传统灌溉粗放、土地不平整致灌溉不均,是浪费水的主因。智能灌溉借助现代信息技术实现按需供水,土地平整技术通过高精度改造为均匀灌溉创造条件,二者在节水目标与技术逻辑上高度契合,集成应用潜力大。但当前研究多聚焦单一技术,缺乏对二者系统性集成等深入探讨。本文将填补这一空白,阐述二者在节水型高标准农田中的集成路径等,为农业现代化提供依据。

1 智能灌溉技术:原理、类型与发展

1.1 技术原理与核心组件

智能灌溉系统是以作物生理需水规律为基础,通过传感器网络实时采集土壤墒情、气象数据、作物长势等多源信息,经由中央控制平台进行数据融合与需水模型计算,最终驱动执行机构(如电磁阀、水泵)实现按需、按量、按时精准灌溉的闭环控制系统^[1]。其核心组件包括:(1)感知层:土壤水分传感器(TDR、FDR)、气象站(温湿度、降雨、风速、辐射)、作物冠层传感器(NDVI、叶面积指数)等;(2)传输层:LoRa、NB-IoT、5G等低功耗广域网技术,实现田间数据无线回传;(3)决策层:基于Penman-Monteith公式、FAO-56双作物系数法或机器学习模型(如LSTM、随机森林)构建的需水预测与

灌溉调度算法;(4)执行层:变频水泵、电动/电磁阀、水肥一体化装置等,支持远程控制与自动启停。

1.2 主要技术类型

目前主流的智能灌溉系统主要包括:(1)基于土壤墒情的反馈式灌溉:以土壤含水量阈值为触发条件,当实测值低于设定下限时启动灌溉,适用于大田作物。(2)基于气象数据的开环预测式灌溉:利用参考作物蒸散量(ET₀)和作物系数(K_c)估算实际需水量,提前制定灌溉计划。(3)基于作物生理指标的精准灌溉:通过茎流计、热脉冲传感器等监测作物水分胁迫状态,实现“按需供水”,多用于高附加值经济作物。(4)水肥一体化智能系统:将灌溉与施肥同步进行,根据作物营养需求动态调整肥液浓度与灌溉量,实现水肥协同高效利用。

1.3 发展现状与挑战

近年来,我国智能灌溉技术发展迅速,已在新疆棉花、东北玉米、华北小麦等主产区开展示范应用。然而,仍面临成本偏高、设备稳定性不足、农民接受度低、缺乏统一标准等挑战。尤其在小农户分散经营模式下,规模化推广难度较大。

2 现代土地平整技术:精度、方法与作用

2.1 技术内涵与精度要求

土地平整是指通过工程措施调整田面高程,使其满足特定灌溉方式(如畦灌、沟灌、喷微灌)对地形均匀性的要求。传统人工或机械平地精度通常在±5-10cm,难以满足高效节水灌溉需求。现代高精度土地平整技术可将田面高差控制在±2cm以内,甚至达到±1cm,为均匀布水奠定基础。

2.2 主要技术方法

(1) 激光控制平地技术 (LLL): 利用激光发射器建立水平基准面, 接收器安装在平地铲上, 实时反馈高程偏差并自动调节铲刀高度。该技术成熟、成本适中, 已在印度、巴基斯坦及我国黄淮海平原广泛应用。(2) 卫星导航平地技术: 基于RTK-GNSS (实时动态定位) 技术, 通过预设数字高程模型 (DEM) 指导平地机作业, 精度可达 $\pm 1-2\text{cm}$, 且不受视线遮挡影响, 适用于大面积连片农田。(3) 无人机+LiDAR辅助设计: 利用无人机搭载激光雷达 (LiDAR) 或摄影测量设备获取高精度田块三维模型, 生成最优平整方案 (如最小土方量设计), 再指导GNSS平地机作业, 实现“设计—施工”一体化。

2.3 节水机理

高精度土地平整的节水效应主要源于其对田间水流运动的优化。在传统畦灌或沟灌模式下, 若田面存在较大高差, 灌溉水会迅速向低洼处汇集, 导致上游区域尚未充分湿润即停止供水, 而下游则发生深层渗漏或地表径流, 造成水资源双重浪费^[2]。平整后的田块显著提升了水流推进的同步性与覆盖的完整性, 使灌溉均匀度 (DU) 大幅提高。

3 智能灌溉与土地平整的集成逻辑与模式

3.1 技术耦合的内在逻辑

智能灌溉与土地平整虽分属信息控制与土木工程两个不同领域, 但其在构建高效节水农田系统中呈现出深刻的内在耦合关系。土地平整为智能灌溉提供了不可或缺的物理前提。试想, 即便拥有最先进的传感器网络与决策算法, 若田面高低不平, 水流仍会受重力支配而无法按系统指令均匀分布, 导致高处传感器持续显示“缺水”而低处已积水成涝, 使得整个智能系统陷入“数据失真—决策错误—执行无效”的恶性循环。反之, 智能灌溉则是土地平整效益得以充分发挥的软件保障。一块经过高精度平整的田地, 其潜在的节水能力只有在精准、按需的灌溉制度下才能被激活; 若仍沿用粗放的漫灌方式, 不仅无法体现平整投资的价值, 甚至可能因过量灌溉引发次生盐渍化等问题。因此, 二者构成“硬件筑基、软件赋能”的有机整体, 前者解决“水能否均匀到达”的问题, 后者解决“何时浇、浇多少”的问题, 唯有协同实施, 方能实现节水增效的最大化。

3.2 集成应用模式

3.2.1 大田粮食作物集成模式

我国黄淮海平原、东北平原等粮食主产区, 以冬小麦—夏玉米或水稻—油菜轮作为主, 地块大、地形平缓但微地貌起伏, 传统漫灌水资源的浪费严重。集成模式构

建高效水管理系统, 以高精度土地平整为基础, 智能灌溉为调控中枢。利用GNSS或激光平地技术统一平整连片农田, 控制田面高差在 ± 1.5 至 ± 2 厘米, 规划标准畦田单元。布设土壤墒情与微型气象监测网络, 数据传至云端决策平台, 动态计算作物需水量, 生成分区轮灌计划^[3]。农户通过手机APP远程启动首部变频泵组及电磁阀, 实现精准供水。配套低压管道输水系统, 减少输水损失。该模式提升水资源利用效率, 促进单产提升, 保障国家粮食安全与水资源可持续利用。

3.2.2 高附加值经济作物集成模式

果园、设施蔬菜、花卉等高附加值经济作物追求品质与效益最大化, 对水肥管理精细化要求高。集成模式技术融合性与管理复杂性更强。先进行超高精度土地微地形平整, 精度达 ± 1 厘米, 消除影响滴灌或微喷均匀性的高差。根据作物行距与种植模式, 铺设滴灌带或微喷带, 接入集成EC、pH值及氮磷钾离子传感器的智能水肥一体化首部系统。系统融合作物生理反馈信息, 如葡萄园结合茎流计监测植株蒸腾速率调整灌溉量, 温室番茄利用多光谱相机获取NDVI图像反演冠层水分胁迫状况生成变量灌溉处方图。依托农场级数字孪生平台整合全要素数据, 自动执行灌溉施肥指令, 提供病虫害预警、产量预估等增值服务。闭环管理模式实现生产要素极致节约与精准投放, 提升经济效益与生态友好性。

3.2.3 区域规模化智慧灌区集成模式

集成应用扩展至整村、整乡乃至整个灌区, 系统性和协同性要求更高。区域规模化智慧灌区集成模式打破田块边界, 优化配置水资源。以高标准农田建设项目为载体, 整合土地平整、智能灌溉等六大工程。土地层面, 无人机LiDAR航测获取全域高精度三维地形模型, 设计土方平衡方案, 指导平地机群作业。水利层面, 渠系防渗衬砌, 安装流量计精准计量水量。信息层面, 构建物联网感知网络与边缘计算节点, 数据汇聚至区域智慧水利云平台^[4]。平台进行水资源供需平衡分析、灌溉轮次优化调度, 应急时实现水源联调联供。形成现代化农业生产新格局, 为区域农业高质量发展提供基础设施支撑。

4 典型应用案例与效益分析

4.1 案例一: 黄淮海平原冬小麦—夏玉米轮作区 (河南周口)

河南周口某示范区原有灌溉方式为大水漫灌, 田面高差普遍在8至12厘米之间, 灌溉水利用系数仅为0.45, 水资源浪费严重。项目实施中, 首先采用GNSS平地机对3000亩连片农田进行高精度平整, 目标田面高差控制在 ± 1.5 厘米以内; 随后布设12个土壤墒情监测站, 覆盖全

区域，并配套建设智能首部控制系统，支持农户通过手机远程启停灌溉。同时，原有土渠被替换为低压管道输水系统。经过连续两年的运行监测，田间灌溉均匀度由原来的58%显著提升至89%，年均节水率达到28.6%，相当于每亩节约灌溉用水120立方米。得益于水分供应的均匀性改善，冬小麦与夏玉米的出苗率与群体整齐度明显提高，平均增产8.3%。此外，由于灌溉过程实现自动化，人工巡检与开关闸门的劳动力投入减少60%，显著降低了生产成本。

4.2 案例二：新疆南疆棉花膜下滴灌区（阿克苏）

新疆阿克苏地区虽已普及膜下滴灌技术，但由于早期土地平整度不足，田间毛管首尾压力差异大，末端出水不均，限制了系统效能。针对此问题，项目对棉田实施激光平地改造，将田面标准偏差从4.2厘米降至1.8厘米，并同步升级为智能水肥一体化系统，集成土壤NPK传感器与自动施肥装置。灌溉决策采用基于棉花生育期的AI模型，动态调整各阶段的灌溉定额与肥料浓度。实施后，滴灌系统均匀度提升至92%，不仅节水19.5%，还实现节肥15%。籽棉亩产增加23公斤，增幅达6.7%。更重要的是，农田水分利用效率（WUE）从1.2公斤/立方米提升至1.5公斤/立方米，标志着水资源转化为经济产出的效率显著增强。

5 推进集成应用的政策建议与未来展望

5.1 政策建议

为加速智能灌溉与土地平整集成技术的规模化应用，亟需强化顶层设计与政策引导。首先，应将高精度土地平整与智能灌溉系统纳入高标准农田建设的技术强制规范，在项目验收标准中明确设置田面平整度、智能控制设备覆盖率、灌溉水利用系数等量化指标，确保建设质量。其次，加大财政补贴力度，对农户或合作社购置GNSS平地机、智能首部、土壤传感器等关键设备给予不低于50%的购置补贴，并探索以奖代补、贷款贴息等多元化支持方式，有效降低初始投资门槛。第三，大力培育专业化社会化服务组织，鼓励成立“智慧农田托管公司”，提供从地形测绘、平整设计、设备安装到后期运维的一站式服务，破解小农户“用不起、不会用”的现实

困境。最后，加快标准体系建设，尽快出台《高标准农田智能灌溉系统建设指南》《农田土地平整精度分级标准》等技术规范，统一设备接口、数据格式与工程质量要求，为行业健康发展提供制度保障。

5.2 未来研究方向

面向未来，该领域的科技创新仍有广阔空间。一是发展多源数据融合的灌溉决策模型，综合利用卫星遥感、无人机影像与地面传感网络，构建“天—空—地”一体化的作物需水反演体系，提升模型的时空分辨率与适应性。二是推进数字孪生农田建设，基于高精度数字高程模型与作物生长模拟模型，构建虚拟农田镜像，实现灌溉方案的仿真优化、灾害情景推演与管理策略预演。三是探索低碳智能灌溉路径，将光伏提水、储能电池与智能控制系统集成，打造“零碳”或“近零碳”灌溉示范区，助力农业碳中和目标。四是深化人工智能应用，利用强化学习等先进算法，使灌溉系统具备自主学习与环境自适应能力，能够根据历史表现与实时反馈不断优化灌溉策略，迈向真正的“智慧农业”。

6 结语

智能灌溉与土地平整技术的集成应用，是破解农业水资源约束、建设节水型高标准农田的关键路径。二者通过“硬件筑基、软件赋能”的协同机制，不仅显著提升了灌溉水利用效率与作物产量，还降低了生产成本与环境负荷。未来，应通过政策引导、技术创新与模式创新，加速该集成技术在全国范围内的规模化、标准化推广，为保障国家粮食安全、推动农业绿色转型提供坚实支撑。

参考文献

- [1]梁晓波.高标准农田建设中的灌溉水效提升研究[J].农业科技创新,2025,(35):66-68.
- [2]姜卓群,张育钊.基于水资源供需分析的高标准农田节水灌溉技术优化研究[J].地下水,2025,47(06):116-118+174.
- [3]王斌.高标准农田灌溉技术要点和节水管理措施[J].江西农业,2025,(19):94-96.
- [4]杨雅.高标准农田建设中节水灌溉技术的应用探析[J].当代农机,2025,(09):83-84.